

Теплообмен при ламинарном течении жидкости в трубах

Механизм процесса теплоотдачи при течении жидкости в прямых гладких трубах является сложным.

Интенсивность теплообмена может изменяться в широких пределах и в большей степени зависит от скорости движения потока.

Характер движения жидкости в трубах может быть ламинарным, турбулентным и переходным.

О режиме течения судят по величине числа Рейнольдса:

$$Re = w \cdot d / \nu$$

где w – средняя скорость жидкости; d – внутренний диаметр; ν – коэффициент кинематической вязкости.

Если $Re < 2100$, то движение жидкости ламинарное. При $Re > 10000$ в трубе устанавливается развитое турбулентное течение жидкости.

Формирование характера потока происходит в начальном участке трубы.

При входе в трубу скорости по сечению распределяются равномерно.

В дальнейшем при течении вдоль трубы у стенок образуется *гидродинамический пограничный слой*, толщина которого постепенно увеличивается и становится равной радиусу трубы, а распределение скоростей становится постоянным (D-профиль), - т.наз. *участок гидродинамической стабилизации*.

Его длина при ламинарном режиме определяется:

$$l_{y.э.с.} = 0,065 \cdot Re \cdot d$$

Если температура жидкости отлична от температуры стенки, у поверхности трубы образуется *тепловой пограничный слой*, толщина которого увеличивается и, наконец, становится равной диаметру трубы.

При этом вначале только пристенный слой жидкости участвует в теплообмене, а температура в ядре потока остаётся той же, что и на входе в трубу.

Расстояние от входа в трубу, на котором тепловой пограничный слой заполняет всё сечение трубы, называется *участком тепловой стабилизации*.

Длина участка тепловой стабилизации определяется при $t_c = \text{const}$

$$l_{y.m.c.} = 0,055 \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot d$$

при $q_c = \text{const}$

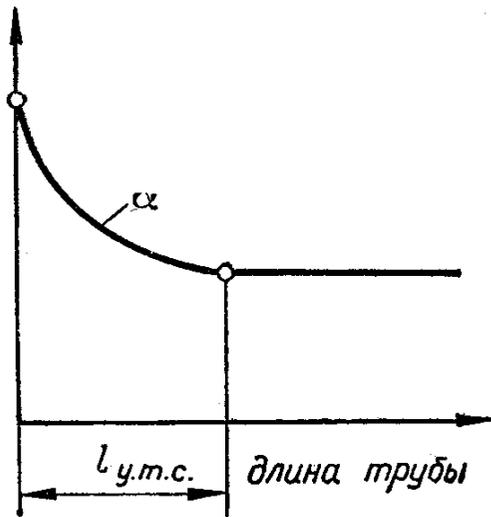
$$l_{y.m.c.} = 0,07 \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot d$$

У входа в трубу коэффициент теплоотдачи α имеет максимальное значение. На участке тепловой стабилизации производная $\left(\frac{\partial J}{\partial r}\right)_{r=r_0}$

падает (где $J = \bar{t}_{жс} - t_c$, $\bar{t}_{жс} = \frac{1}{L_F} \int t w dF$, $t_c = const$), при

этом $a = -\frac{1}{J_c} \left(\frac{\partial J}{\partial r}\right)_{r=r_0}$ также падает.

При стабилизированном течении α можно считать постоянным.



При ламинарном изотермном течении жидкости скорости по сечению потока на расстоянии r_x от оси трубы распределяются по параболе

$$w = w_{\text{макс}} \left(1 - r_x^2 / r^2 \right)$$

где $w_{\text{макс}}$ – скорость жидкости на оси трубы (при $r_x=0$); r – радиус трубы.

На оси трубы скорость будет максимальной, а у стенки равна нулю. Средняя скорость при ламинарном течении $\bar{w} = 0,5w_{\text{макс}}$.

При ламинарном течении жидкости встречаются два режима неизотермического движения:

вязкостный

вязкостно-гравитационный.

Вязкостный режим соответствует течению вязких жидкостей при отсутствии естественной конвекции.

В этом режиме передача теплоты к стенкам канала (и наоборот) осуществляется только теплопроводностью.

Вязкостно-гравитационный режим имеет место, когда вынужденное течение жидкости сопровождается естественной конвекцией.

В этом режиме теплота передаётся не только теплопроводностью, но и конвекцией.

Распределение скоростей зависит от направления теплового потока:

при нагревании жидкости её температура у стенки выше температуры основного потока, а вязкость меньше и скорость выше («правильный» D-профиль);

при охлаждении процессы протекают в обратном направлении («вытянутый» D-профиль).

Следовательно, *при нагревании жидкости её скорость у стенки больше, чем при охлаждении, и теплоотдача выше.*

При *вязкостно-гравитационном* режиме важно отметить направление свободной конвекции и вынужденного движения. Они могут

- совпадать,
- быть противоположны друг другу,
- быть взаимно перпендикулярными.

При *совпадении* движений естественной и вынужденной конвекции скорость жидкости у стенки возрастает и теплоотдача увеличивается (вертикальные трубы).

При *противоположном направлении* движений вынужденной и естественной конвекции скорость у стенки уменьшается и теплоотдача падает, но когда у стенки образуется вихревое движение, теплоотдача увеличивается (движение нагреваемой жидкости сверху вниз).

При *взаимно перпендикулярном* движении естественной и вынужденной конвекции вследствие лучшего перемешивания жидкости теплоотдача увеличивается (горизонтальные трубы, где жидкость движется как бы по спирали).

Т.о., в неизотермических условиях строго ламинарный режим не существует.

При вязкостном режиме средний коэффициент теплоотдачи в прямых гладких трубах

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,15 Re_{ж,d}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left(Pr_{ж} / Pr_{ст} \right)^{0,25}$$

Для вязкостно-гравитационного режима

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,15 Re_{ж,d}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot Gr_{ж,d}^{0,1} \left(Pr_{ж} / Pr_{ст} \right)^{0,25}$$

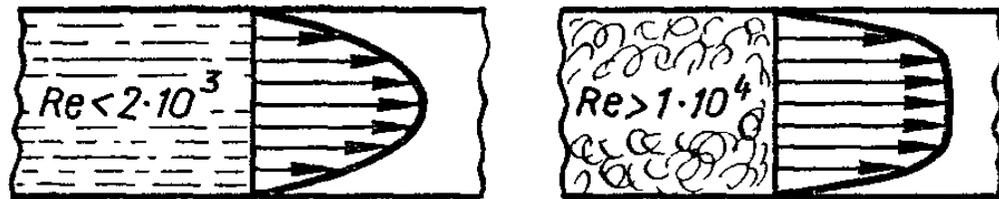
за определяющую скорость принята средняя скорость жидкости в трубе;
за определяющий размер – диаметр круглой трубы или эквивалентный диаметр.

Чтобы определить наличие влияния естественной конвекции, рассчитывают величину $(Gr \cdot Pr)_Г$, где определяющей температурой является $t_Г = 0,5 \cdot (\bar{t}_c + \bar{t}_{жс})$.

Если $(Gr \cdot Pr)_Г < 8 \cdot 10^5$, то режим вязкостный, и вязкостно-гравитационный, если наоборот.

Для труб, с $l/d < 50$ следует значение α умножить на средний поправочный коэффициент $\bar{e}_l \sim 1,0-2,0$.

Теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубах



При турбулентном движении жидкости *только у самой стенки* образуется ламинарный подслой, представляющий основное термическое сопротивление.

При стабилизированном потоке распределение скоростей по сечению имеет вид усеченной параболы. Наиболее резко скорость потока изменяется вблизи стенки в пределах пограничного слоя.

Толщину вязкого подслоя в турбулентном режиме можно найти:

$$d_{в.п.} = \frac{65d}{\text{Re}^{0,9}}$$

Длина участка гидродинамической стабилизации при турбулентном режиме течения (вход в трубу с острыми кромками) определяется:

$$l_{у.з.с.} = 1,45 \cdot \text{Re}^{0,25} \cdot d$$

В практических расчетах пользуются средними скоростями

$$\bar{w} = L / F ,$$

где L – секундный объем жидкости, м³/сек;

F – площадь поперечного сечения трубы, м².

При турбулентном режиме отношение средней скорости к максимальной является функцией числа Re

$$\bar{w} / w_{\text{макс}} = f(\text{Re}) \approx 0,8 - 0,9 .$$

При турбулентном потоке жидкость весьма интенсивно перемешивается и естественная конвекция практически не оказывает влияния на теплоотдачу. Поэтому из определяющих чисел подобия исключается число Грасгофа.

Температура жидкости по сечению ядра практически постоянна.

При нагревании жидкости интенсивность теплоотдачи выше, чем при охлаждении жидкости. Эта зависимость также учитывается отношением $(Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25}$.

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи при развитом турбулентном движении ($Re_{ж,d} > 10^4$), когда $l/d > 50$, рекомендуется следующее уравнение подобия

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,021 Re_{ж,d}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left(Pr_{ж} / Pr_{ст} \right)^{0,25}$$

за определяющую температуру принята средняя температура потока;

за определяющий размер принят диаметр круглой трубы или эквивалентный диаметр.

Для труб, с $l/d < 50$ коэффициент теплоотдачи выше, поэтому значение \bar{a} следует умножить на средний поправочный коэффициент $\bar{e}_l \sim 1,0-2,0$.

Анализ критериальных уравнений теплоотдачи при течении жидкости в трубах показывает, что:

увеличение скорости жидкости w в трубе при сохранении постоянными d , $\overline{t_c}$, $\overline{t_{ж}}$ приводит к увеличению \overline{a} , причём при ламинарном режиме $\overline{a} \sim w^{0,5}$, а при турбулентном $\overline{a} \sim w^{0,8}$, т.е. при турбулентном режиме теплоотдача более интенсивна;

увеличение диаметра при сохранении постоянными w , $\overline{t_c}$, $\overline{t_{ж}}$, очевидно, уменьшает интенсивность теплоотдачи, причём в турбулентном режиме $\overline{a} \sim d^{-0,2}$.